



ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-1-1

УДК 631.56:621.92

С. П. Степаненко, д.т.н.,

ORCID: 0000-0002-8331-4632

В. Г. Мироненко, д.т.н.,

ORCID: 0000-0002-1227-2471

С. П. Погорілий, д.т.н.,

ORCID: 0000-0002-9701-2678

*Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва
Національної академії аграрних наук України*

e-mail: stepanenko_s@ukr.net

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ПОШКОДЖЕННЯ ЗЕРНА
В ПРОЦЕСАХ СЕПАРАЦІЇ**

Анотація. Створено структурну модель процесу пошкодження зернівки в процесі сепарації і розроблено критеріальне рівняння, яке включає шість показників. Отримані регресійні рівняння дозволяють оцінити рівень пошкодження залежно від впливових факторів, таких як сила впливу, імпульс сили, модуль пружності, густина і жорсткість оболонки зернівки. Визначено, що найбільший вплив на пошкодження надає сила впливу (залежність кубічного типу), імпульс сили (обернена квадратична залежність), модуль пружності та жорсткість (логарифмічна залежність), а густина зернівки має лінійну залежність. Отримана залежність підходить для прогнозування мікротравмування та пошкодження зернівки, якщо відомі п'ять параметрів, що описують фізико-механічні властивості даної культури.

Розглянемо фізичний сенс π -критеріїв на прикладі процесу пошкодження зерна в процесах сепарації при силовому впливі. Встановлено, що модуль пружності характеризує здатність зернівки до еластичної деформації під дією сили. Основний вплив на ушкодження зернівки має сила впливу, і цей вплив має кубічну залежність. Чим більше сила, щільність зернівки і менше його еластичні властивості, тим інтенсивніше буде його ушкодження. Встановлено також, що другий критерій π_2 включає відношення між модулем пружності та силою впливу на зернівку. Цей показник характеризує вплив молекулярних сил зв'язку під дією сили. Він відображає здатність зернівки до еластичної деформації при збереженні внутрішніх атомних зв'язків в межах еластичної деформації. Отже, якщо $E > F$, то в зернівці відбувається процес релаксації: система повертається до початкового стану до прикладання сили, відновлюються атомні зв'язки, зберігається структура зернівки, мікротріщини загоюються. За умови ж коли $E < F$, то атомні зв'язки руйнуються, починається розвиток тріщин, деформація переходить з еластичної в пластичну, необоротну.

Ключові слова: моделювання, пошкодження, зерно, сепарація, критеріальне рівняння, теорія розмірностей, зерновий матеріал, робочий орган.



Постановка проблеми. Пошкодження зерна є однією з основних причин погіршення його посівних якостей у рік збирання, що також призводить до зниження продуктивності рослин у наступних поколіннях. Пошкодження зерна виникає через механічну дію робочих органів зернозбиральної техніки та обладнання для післязбиральної обробки та переробки, транспортування тощо. Наукові дослідження свідчать, що в середньому 25% зерна пошкоджується під час збору комбайном, а до 50% - при навантаженні, розвантаженні, очищенні, сушінні та транспортуванні. Тому проблема зменшення механічних втрат зерна є актуальною і своєчасною [1, 2, 3].

Процес пошкодження зерна обумовлений ударним зіткненням із поверхнями робочих органів та тертям зерна між собою і контактними поверхнями. Механічні травми поділяються на три категорії: бите зерно, зерно з макротравмами та зерно з мікротравмами. Слід відмітити, що переважно зерно пошкоджується під час післязбиральної доробки, зокрема під час сепарації та сушіння, але найбільше якість зерна знижується під час транспортування в зерносховищах. В реальності збиральна та післязбиральна обробка зберігають в ідеальному стані лише близько 20-25% насіння, тоді як решта зазнає різних пошкоджень, тріщин або деформацій. Значна кількість технологічних операцій після збирання створює різний ступінь механічного пошкодження зерна [4, 5, 10-16].

Для зменшення рівня пошкодження зерна під час післязбиральної обробки рекомендується застосовувати такі заходи: сушіння при м'яких температурних режимах, обмолот з урахуванням вологості зерна, менш інтенсивне сепарування та зменшення кількості переміщень зерна норіями та конвеєрами. Існує два підходи до вирішення цієї проблеми: перший - скорочення кількості обладнання в транспортно-технологічних лініях для обробки зерна, і другий - мінімізація травмування зерна під час виконання залишених операцій. Перший підхід передбачає розробку багатофункціональних машин з можливістю регулювання режимів роботи, а другий - м'який вплив на зерно виконавчих механізмів [3, 4, 5].

Аналіз останніх досліджень. Дослідження робочих органів під час післязбиральної обробки зернового вороху та підготовки насіння, а також теоретичне обґрунтування і моделювання процесів сепарації в залежності від біологічного стану зернової маси, її компонентів, стану вологості та впливу на подальший ріст і продуктивність рослин розглядаються у наукових працях відомих авторів [1, 6, 7, 8]. За даними Інституту зернових культур НААН України, при проходженні зернової суміші через трієри та насіннепроводи, схожість насіння знижується на 2-3%, а початкова сила росту зменшується на 6-12%



навіть після одного циклу очищення (сепарації). Значний вплив на пошкодження зерна має зношення робочих поверхонь через тертя з механізмами та зерновими потоками. У наукових роботах [4-6, 9, 11-13] значна увага приділяється вивченню взаємодії елементів механізмів із зерною масою та визначенню раціональних параметрів і режимів роботи для зменшення пошкоджень зерна.

Формулювання мети статті. Дослідити фактори пошкодження зерна в процесах сепарації зернового матеріалу та визначити рівень травмування зерна на різних етапах післязбиральної обробки.

Матеріали, методи та об'єкти дослідження. Методика аналітичних досліджень, що ґрунтується на оцінці пошкодження зерна обладнанням, яке використовується в технологічних процесах післязбиральної обробки зернових культур. Застосування теорії розмірностей для дослідження факторів пошкодження зерна в процесах сепарації дасть змогу побудувати математичну модель процесу пошкодження зерна.

Основна частина. На пошкодження зерна, яке відбувається через взаємодію з поверхнями тертя зерноочисних машин (зовнішні фактори), а також через морфологічні, анатомічні та фізико-механічні характеристики зерна (внутрішні фактори), впливають численні параметри. Дані параметри можуть бути як незалежними, так і взаємозалежними, і можуть змінюватися в широкому діапазоні.

Для оцінки ступеня пошкодження зерна слід дослідити структурну модель цього процесу рис. 1.

У цю модель включають морфологічні, анатомічні та фізико-механічні характеристики зерна, а також параметри сили впливу і особливості взаємодії зерна з контактними поверхнями. Комплекс параметрів може розширюватися і змінюватися з удосконаленням розуміння фізики процесу травмування і переосмислення цього явища в процесах сепарації. На даному етапі, на наш погляд, найважливішими є 15 параметрів, з яких 3 є безрозмірними. Оскільки силовий вплив розглядається для окремої зернівки (або точніше, для її поверхні тертя), параметри зернового потоку не враховуються в моделі. Крім того, система вважається автодостатньою щодо часу, умов навколишнього середовища і інших зовнішніх факторів.

У випадку, якщо сила впливу робочих органів на зерно мінімальна, основними факторами для прогнозування пошкодження будуть не параметри силового впливу, а морфологічні і фізико-механічні властивості зерна. Тобто в кожній конкретній ситуації набір параметрів може варіюватися, але в межах сучасного рівня знань явище не виходить за рамки представленої схеми системи.

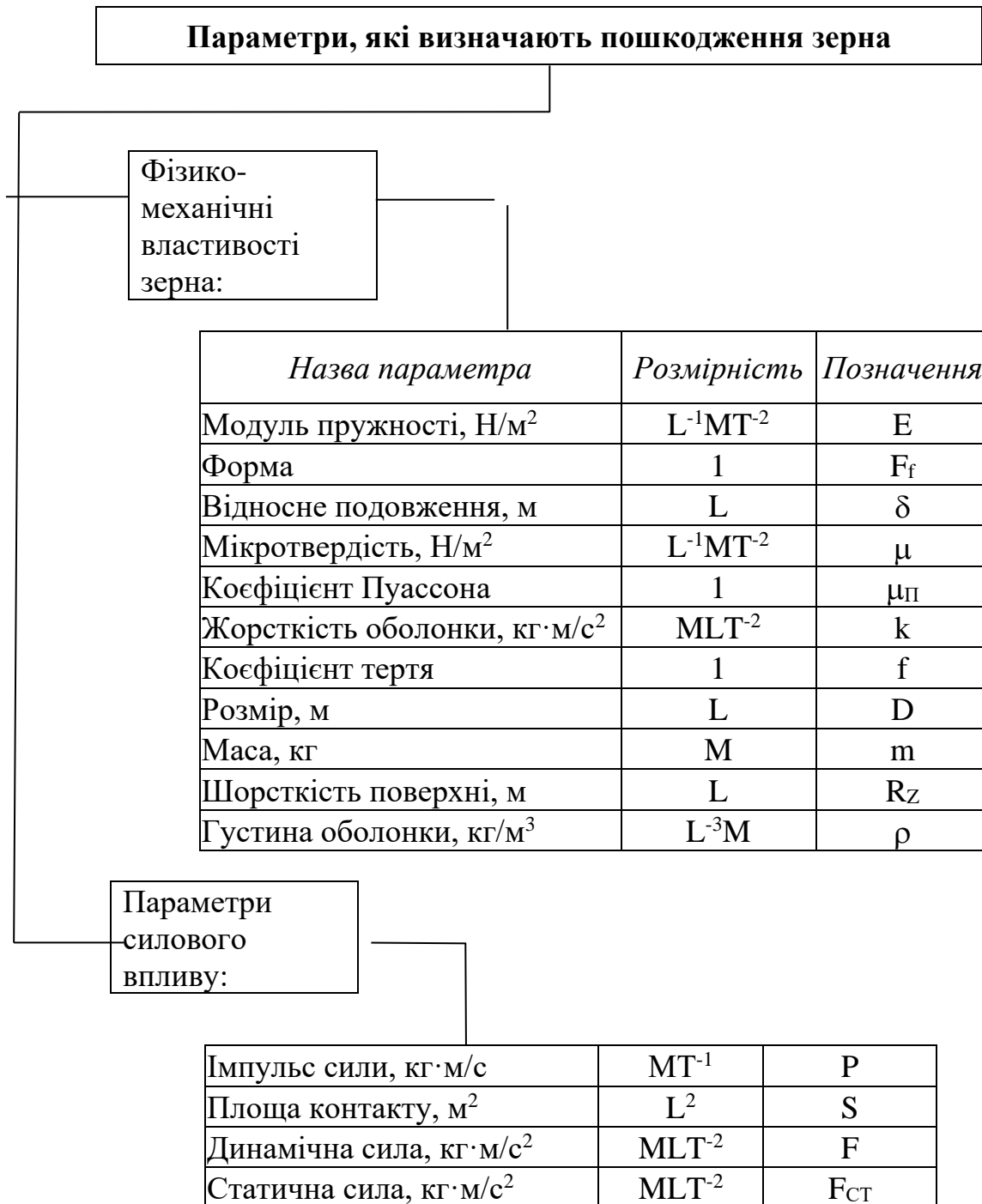


Рис. 1. Структурна модель пошкодження зерна

У наукових джерелах є підтвердження того, що морфологічні та анатомічні характеристики зерна впливають на його фізико-механічні властивості [2, 3, 7, 8]. Наприклад, густина зерна залежить переважно від хімічного складу та пропорцій органічних компонентів. Різні органічні речовини, що містяться в зерні, мають значні відмінності в густині. Густина зерна також змінюється в залежності від його



зрілості: більш зрілі зерна мають вищу густину. Зі зростанням зрілості зерна густина може істотно змінюватися через зміну хімічного складу і зменшення вмісту вологи.

Вологість є критичним фактором, який визначає багато фізико-механічних характеристик зерна. Відомо, що при зсувних, стискальних і розривних навантаженнях міцність зерна зменшується із підвищенням вологості.

Температура також має вплив на фізико-механічні властивості зерна. В межах температурного діапазону від $+30^{\circ}$ до -30° міцність зерна знижується з пониженням температури, що робить його більш крихким [10-15].

Параметри, що включені в структурну модель, описують зерно за масою і розміром (маса, діаметр, вага), пружними властивостями (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона), а також механічними властивостями оболонки (жорсткість, коефіцієнт тертя, товщина оболонки).

Згідно із заданою структурною моделлю, пошкодження зерна під впливом силових навантажень від робочих органів можна виразити наступним чином:

$$L = f(F, P, E, \rho, k, R_z, S, D, m), \quad (1)$$

Пошкодження зерна є складним явищем. Аналіз і експериментальні дослідження продемонстрували [8-10, 16-25], що рівень травмування (пошкодження) прямо корелює з розмірами мікротріщин. Тому для характеристики пошкодження використовується розмірність « L ».

Процес пошкодження зерна під дією силового навантаження є функцією дев'яти основних розмірних параметрів. Визначивши розмірності всіх параметрів, можна встановити кількість основних розмірностей: маса (M), довжина (L), час (T).

Застосовуючи теорію розмірностей [25-29], створимо математичну модель процесу пошкодження зерна. У формі критеріального рівняння можна записати наступне:

$$F(\pi_1; \pi_2; \pi_3; \pi_4; \pi_5; \pi_6) = 0, \quad (2)$$

Щоб утворити π -критерії, скористаємося теорією розмірностей. Це дозволить звести всі параметри до безрозмірних комбінацій, що спростить аналіз і моделювання процесу.

$$\pi_1 = F^{\varepsilon_{11}} P^{\varepsilon_{12}} E^{\varepsilon_{13}} \rho, \quad (3)$$

$$\pi_2 = F^{\varepsilon_{21}} P^{\varepsilon_{22}} E^{\varepsilon_{23}} k, \quad (4)$$

$$\pi_3 = F^{\varepsilon_{31}} P^{\varepsilon_{32}} E^{\varepsilon_{33}} R_z, \quad (5)$$



$$\pi_4 = F^{\varepsilon_{41}} P^{\varepsilon_{42}} E^{\varepsilon_{43}} S, \quad (6)$$

$$\pi_5 = F^{\varepsilon_{51}} P^{\varepsilon_{52}} E^{\varepsilon_{53}} D, \quad (7)$$

$$\pi_6 = F^{\varepsilon_{61}} P^{\varepsilon_{62}} E^{\varepsilon_{63}} m, \quad (8)$$

Запишемо рівняння (3) в розмірному вигляді:

$$[M^0 T^0 L^0] = \left[\frac{ML}{T^2} \right]^{\varepsilon_{11}} \left[\frac{ML}{T} \right]^{\varepsilon_{12}} \left[\frac{M}{LT^2} \right]^{\varepsilon_{13}} \left[\frac{M}{L^3} \right], \quad (9)$$

Перетворимо рівняння (9) в наступну залежність:

$$[M^0 T^0 L^0] = M^{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} + \varepsilon_{13} + 1} \times L^{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13} - 3} \times T^{-2\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12} - 2\varepsilon_{13}}, \quad (10)$$

Визначемо показники степенів із наступної системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} + \varepsilon_{13} + 1 &= 0 \\ \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13} - 3 &= 0, \\ -2\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12} - 2\varepsilon_{13} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Вирішивши отриману систему рівнянь одержимо значення ε_{11} , ε_{12} , ε_{13} , які відповідно дорівнюють $\varepsilon_{11} = 3$, $\varepsilon_{12} = -2$, $\varepsilon_{13} = -2$.

Тоді перший π критерій запишемо, як:

$$\pi_1 = F^3 P^{-2} E^{-2} \rho, \quad (12)$$

За аналогією визначимо значення інших π критеріїв в такій формі:

$$\pi_2 = F^{-1} P^0 E^0 k, \quad (13)$$

$$\pi_3 = F^{-\frac{1}{2}} E^{\frac{1}{2}} R_z, \quad (14)$$

$$\pi_4 = F^{-1} E S, \quad (15)$$

$$\pi_5 = D \sqrt{\frac{E}{F}}, \quad (16)$$

$$\pi_6 = F^{\frac{3}{2}} P^{-2} E^{-\frac{1}{2}} m, \quad (17)$$

Отже, рівняння процесу пошкодження зерна в безрозмірній формі, можна навести в наступному вигляді:

$$L = f \left(\frac{F^3 \rho}{P^2 E^2}, \frac{k}{F}, R_z \sqrt{\frac{E}{F}}, \frac{ES}{F}, D \sqrt{\frac{E}{F}}, F^{\frac{3}{2}} \frac{m}{P^2 \sqrt{E}} \right), \quad (18)$$

де L – пошкодження зернівки при силовому впливі.



Фізичний сенс π -критеріїв полягає в тому, що вони є безрозмірними комбінаціями змінних, які допомагають спростити аналіз складних процесів і явищ, пов'язуючи їх з ключовими параметрами. Вони дозволяють досліджувати вплив різних факторів на процес, не залежачи від одиниць вимірювання, що робить їх корисними для узагальнення результатів і виявлення основних закономірностей.

Розглянемо фізичний сенс π_1 -критерія на прикладі процесу пошкодження зерна при силовому впливі залежність (12). Отже, модуль пружності (E) характеризує здатність зернівки до еластичної деформації під дією сили. Це показник напруження в зернівці, викликаного прикладеною силою, відносно площі її контакту. Основний вплив на ушкодження зернівки має сила впливу, і цей вплив має кубічну залежність. Чим більше сила, щільність зернівки і менше його еластичні властивості, тим інтенсивніше буде його ушкодження.

Другий критерій π_2 визначається з рівняння (13) k - це жорсткість оболонки зернівки, E - модуль пружності, а S - площа контакту. Жорсткість включає відношення між модулем пружності та силою впливу на зернівку. Жорсткість можна визначити як добуток модуля пружності E (наприклад, при стисненні) на геометричну характеристику перерізу зернівки, тобто площу впливу S .

Цей показник характеризує вплив молекулярних сил зв'язку під дією сили. Він відображає здатність зернівки до еластичної деформації при збереженні внутрішніх атомних зв'язків в межах еластичної деформації. Якщо $E > F$, то в зернівці відбувається процес релаксації: система повертається до початкового стану до прикладання сили, відновлюються атомні зв'язки, зберігається структура зернівки, мікротріщини загоюються. Якщо ж $E < F$, то атомні зв'язки руйнуються, починається розвиток тріщин, деформація переходить з еластичної в пластичну, необоротну.

Другий критерій описує жорсткість оболонки, тобто її здатність протистояти деформаціям при малих одномірних деформаціях в межах еластичної області.

Третій критерій π_3 визначається з рівняння (14), де R_z - висота нерівностей профілю при контакті двох тіл під дією сили. Цей критерій описує ймовірність виникнення адгезійних сил при формуванні кожної окремої ділянки контакту на геометричній площі дотику між двома тілами.

Четвертий критерій π_4 подібний до другого π_2 .

П'ятий критерій π_5 визначається з рівняння (16), де D - еквівалентний розмір зернівки. Цей критерій вказує на те, що чим більший еквівалентний розмір зернівки, тим більше ймовірність його пошкодження.



Шостий критерій π_6 є схожим на перший π_1 . П'ятий та шостий критерії мають менший вплив на ступінь пошкодження зернівки.

У таблиці 1 представлені дані про L , які були отримані експериментальним шляхом, а також фізико-механічні характеристики зернівки, що використовуються в рівнянні (1). Значення E і R_z у таблиці 1 взяті з наукових публікацій [8, 9, 12, 13, 16-20], в той час як інші параметри були визначені шляхом вимірювань.

Слід відмітити наступне, для того щоб модель (1) коректно відображала основні характеристики досліджуваного процесу, кожен фактор, включений у модель, має демонструвати достатню варіативність у контексті впливу на L .

Зазвичай для визначення необхідної кількості спостережень застосовують метод зменшення числа параметрів шляхом виключення менш значущих з них.

На основі аналізу отриманих даних можна з певною впевненістю стверджувати, що найбільш значущі фактори, впорядковані за їхньою важливістю, наступні: сила впливу F , імпульс сили P , модуль пружності E , щільність ρ та жорсткість оболонки зернятка k (табл. 1).

Таблиця 1

Значення факторів, прийнятих для визначення π -критеріїв

Культура	L , 10^{-3} м	F , кг·м/с ²	P , кг·м/с ²	E , 10^5 кг/м ²	ρ , кг/м ³	k , кг·м/с ²	R_z , 10^4 м	S , 10^{-6} м ²	D , 10^{-3} м	m , 10^{-3} кг
Пшениця	1,4	5,9	0,5	30	1092	3,06	40	1,02	6,7×3,4×2,7	0,036
Горох	1,7	6,4	0,42	60	1150	3,64	35	0,5	6,8	0,245
Тритикале	3,2	7,8	0,35	28	1200	3,97	40	1,3	8×1,9×1,7	0,045
Кукурудза	3,7	8,25	0,3	50	1230	4,45	45	0,89	11,5×8×5,3	0,245
Жито	4,2	8,5	0,29	21	1325	4,5	25	1,89	8×2,6×2,5	0,031

Щоб обчислити шість коефіцієнтів регресійної моделі, включаючи константу, згідно з методами детермінованої математики, необхідно мати вісім рівнянь. Проте, в наявності є лише шість спостережень.

Ми застосували метод для отримання нелінійного рівняння регресії, використовуючи обмежену кількість спостережень [1, 9, 27-29]. На першому етапі проводився пошук адекватного рівняння регресії величини L в залежності від кожного окремого параметра



(F, P, E, ρ, k) . Для цього були розглянуті різні типи залежностей, включаючи лінійну, степеневу, експоненційну, обернену, логарифмічну та інші. Для кожної залежності та кожної змінної якість моделі оцінювалася за критерієм Фішера. Найкращі результати для параметрів F і P були отримані з степеневою моделлю, для E і k - з логарифмічною, а для ρ - з лінійною. В результаті були отримані рівняння регресії для залежності величини L від окремих параметрів.

$$L(F) = 0,0054F^{3,11}, \quad (19)$$

$$L(P) = 0,341P^{-2,06}, \quad (20)$$

$$L(E) = 48,12 - 10,809 \ln(E), \quad (21)$$

$$L(\rho) = -13,14 + 0,013\rho, \quad (22)$$

$$L(k) = -1,14 + 2,936 \ln(k), \quad (23)$$

Сформуємо математичну модель процесу як лінійну комбінацію знайдених функцій (19)-(23).

З використанням даних значень F, P, E, ρ, k (табл. 1) спочатку обчислюємо прогнозовані значення параметра L (табл. 2).

Таблиця 2

Прогнозовані значення параметра L

Культура	$L(F)$	$L(P)$	$L(E)$	$L(\rho)$	$L(k)$
Пшениця	1,277	1,328	3,033	1,056	2,140
Горох	1,632	1,908	2,242	1,181	2,649
Тритикале	2,947	2,788	3,111	2,462	2,904
Кукурудза	3,514	3,842	2,450	2,851	3,239
Жито	3,846	4,122	3,439	4,085	3,272

Наступним кроком є використання даних з (табл. 2), для цього складаємо систему лінійних рівнянь для визначення коефіцієнтів лінійної комбінації знайдених функцій так, щоб результати експериментів з (табл. 1) відповідали отриманим значенням моделі. Рішення цієї системи дає наступні результати (табл. 3).

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів лінійних рівнянь

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
2,151	-1,355	-1,751	0,246	2,853

Шукане рівняння регресії набуде наступного вигляду:



$$L = -7,374 + 0,013F^{3,11} - 0,425P^{-2,06} + 1,996 \ln(E) + 0,003\rho + 8,376 \ln(k), \quad (24)$$

Для перевірки адекватності нами була обрана культура пшениця, для якої $F = 5,9$; $P = 0,5$; $E = 30$; $\rho = 1092$; $k = 3,06$. Отримане за рівнянням (24) значення $L = 1,47$ досить добре узгоджується з результатами експерименту.

Висновки. Розроблена структурна схема процесу пошкодження зернівки та сформульовано критеріальне рівняння, яке включає шість критеріїв.

Сформульовані рівняння регресії для визначення ступеня пошкодження в залежності від таких параметрів: сила впливу, імпульс сили, модуль пружності, густина і жорсткість оболонки зернівки.

Визначено, що найбільший вплив на пошкодження має сила впливу (залежність кубічного типу), імпульс сили (обернена квадратична залежність), модуль пружності та жорсткість (логарифмічна залежність), густина зернівки (лінійна залежність). Рівняння (24) можна використовувати для прогнозування мікротравмування, пошкодження зернівки, якщо відомі п'ять параметрів, що описують фізико-механічні властивості даної культури.

Список використаних джерел

1. Войтюк Д. Г., Гаврилук Г. С. Сільськогосподарські машини. Київ: Каравелла, 2008. С. 317–407.
2. Грабар І. Г., Дерев'янка Д. А., Герук С. М. Вплив чинників післязбиральної обробки зерна на якість насінневого матеріалу *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2010. Вип. 40, ч. I. С. 340–349.
3. Дерев'янка Д. А. Травмування та якість насіння на різних стадіях технологічних процесів. *Інженерія природокористування*. 2014. № 1(1). С. 114–123.
4. Дерев'янка Д. А., Тарасенко О. П., Оробінський В. І. Вплив травмування на якість насіння зернових культур : монографія. Житомир: Нілан-ЛТД, 2012. 440 с.
5. Журнал «Агроном». URL: <http://www.agronom.com.ua> (дата звернення 23.07. 2024).
6. Кісь-Коркіщенко Л. В. Обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів зернових норій. Дис. ... доктора філософії: 133. Харків, 2021. 182 с.
7. Опалко В., Шатров Р. Механічне травмування зерна після збирання. *Agroexpert*. 2017. № 2.



8. Скрипник І. О., Пісарькова І. О., Петренко М. М. Механічне травмування зерна. *Конструювання виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2018. Вип.48. С. 143–153. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.143-153>.
9. Тищенко Л. Н., Ольшанский В. П., Ольшанский С. В. Виброрешетная сепарация зерновых смесей. Харків: МД, 2011. 280 с.
10. Харченко, Є. І. Шаран А. В., Янчук Т. І. Інноваційні технології галузі: Конспект лекцій для студ. спец. 7.05170101, 8.05170101 «Технології зберігання і переробки зерна» денної та заочної форм навчання. Київ: НУХТ, 2014. 94 с.
11. Шаповаленко О. І., Євтушенко О. О., Кожевникова М. І., Шпак О. О. Дослідження ступеню травмування зерна кукурудзи у виробничих умовах. *Хранение и переработка зерна*. 2015. № 2. С. 31–33.
12. Shaaya E., Kostjukovski M., Eilberg J., Sukprakarn C. Plant oils as fumigants and contact insecticides for the control of stored-product insects. *J. Stored Prod. Res.* 1997. Vol. 33. P. 7–15. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(96\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(96)00032-X).
13. MAREČEK J. Conditions for maintaining the quality of the grain at harvest. URL: <http://www.agroporadenstvo.sk> RIGO.
14. Adamchuk V., Bulgakov V., Gadzalo I. [et al.]. Theoretical study of vibrocentrifugal separation of grain mixtures on a sieveless seed-cleaning machine. *Rural Sustainability Research*. 2021. Vol. 46(341). P. 116-124. <https://doi.org/10.2478/plua-2021-0023>.
15. Bala B. K., Haque M. A., Hossain M. A., Majumdar S. Post Harvest Loss and Technical Efficiency of Rice, Wheat and Maize Production System: Assessment and Measures for Strengthening Food Security. Bangladesh Agricultural University; Mymensingh, Bangladesh: 2010.
16. Baoua I., Amadou L., Lowenberg-DeBoer J., Murdock L. Side by side comparison of GrainPro and PICS bags for postharvest preservation of cowpea grain in Niger. *J. Stored Prod. Res.* 2013. Vol. 54. P. 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2013.03.003>.
17. Ben D. C., van Liem P., Dao N. T., Gummert M., Rickman J. F. Effect of Hermetic Storage in the Super Bag on Seed Quality and Milled Rice Quality of Different Varieties in Bac Lieu, Vietnam. *Int. Rice Res. Notes*. 2009. <https://doi.org/10.3860/irrn.v31i2.1138>.
18. De Groote H., Kimenju S. C., Likhayo P., Kanampiu F., Tefera T., Hellin J. Effectiveness of hermetic systems in controlling maize storage pests in Kenya. *J. Stored Prod. Res.* 2013. Vol. 53. P. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2013.01.001>.
19. Kimanya M. E., Meulenaer B., Camp J., Baert K., Kolsteren P. Strategies to reduce exposure of fumonisins from complementary foods in



rural Tanzania. *Matern. Child Nutr.* 2012. Vol. 8. P. 503–511. <https://doi.org/10.1111/j.1740-8709.2011.00337.x>.

20. Kitinoja L. Innovative small-scale postharvest technologies for reducing losses in horticultural crops. *Ethiop. J. Appl. Sci. Technol.* 2013. Vol. 1. P. 9–15.

21. Kotov B., Stepanenko S., Tsurkan O. [et al.]. Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99(1). P. 100-104. <https://doi.org/10.15199/48.2023.01.19>.

22. Mykhailov Ye., Golebiewski J., Kiurchev S., Hutsol T., Kolodii O., Nurek T., Glowacki Sz., Zadosna N., Verkholtantseva V., Palianychka N., Kucher O. Economic and technical efficiency of sunflower seed processing. Monograph. – Warszawa: 2020. 158 с. <https://doi.org/10.22630/SGGW.WE.9788375839340>.

23. Njoroge A., Affognon H., Mutungi C., Manono J., Lamuka P., Murdock L. Triple bag hermetic storage delivers a lethal punch to *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) in stored maize. *J. Stored Prod. Res.* 2014. Vol. 58. P. 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.02.005>.

24. Shvidia V., Stepanenko S., Kotov B. [et al.]. Influence of vacuum on drying of seeds of grain crops. In: Bulletin of the Karaganda University. *Physics series.* 2022. Vol. 3(107). P. 90-98. <https://doi.org/10.31489/2022PH3/90-98>.

25. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A. [et al.]. To the theory of grain motion in an uneven air flow in a vertical pneumatic separation channel with an annular cross section. *Processes.* 2022. Vol. 10(10). P. 1929. <https://doi.org/10.3390/pr10101929>.

26. Stepanenko S., Kotov B., Spirin A. [et al.]. Scientific foundations of the movement of components of grain material with an artificially formed distribution of air velocity. In: Bulletin of the Karaganda University. *Physics series.* 2022. Vol. 1(105). P. 43–57. <https://doi.org/10.31489/2022PH1/43-57>.

27. Suleiman R. A., Kurt R. A. Current maize production, postharvest losses and the risk of mycotoxins contamination in Tanzania; Proceedings of the American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting; New Orleans, LA, USA. 26–29 July 2015.

28. Tefera T., Kanampiu F., de Groote H., Hellin J., Mugo S., Kimenju S., Beyene Y., Boddupalli P.M., Shiferaw B., Banziger M. The metal silo: An effective grain storage technology for reducing post-harvest insect and pathogen losses in maize while improving smallholder farmers' food security in developing countries. *Crop Prot.* 2011. Vol. 30. P. 40–245. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.11.015>.



29. Vales M., Rao C. R., Sudini H., Patil S., Murdock L. Effective and economic storage of pigeonpea seed in triple layer plastic bags. *J. Stored Prod. Res.* 2014. Vol. 58. P. 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.01.004>.

Стаття надійшла до редакції 01.08.2024 р.

S. Stepanenko, V. Myronenko, S. Pogorilyy
Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production, Ukraine

STUDY OF GRAIN DAMAGE FACTORS IN THE PROCESSES OF SEPARATION

Summary

A structural model of the grain damage process during separation has been created, and a criterial equation that includes six indicators has been developed. The obtained regression equations allow assessing the damage level based on influential parameters such as impact force, force impulse, modulus of elasticity, density, and grain hull rigidity. It was determined that the greatest influence on damage is exerted by impact force (cubic dependency), force impulse (inverse quadratic dependency), modulus of elasticity and rigidity (logarithmic dependency), and grain density (linear dependency). The obtained relationship is suitable for predicting micro-damage and grain injury if five parameters describing the physico-mechanical properties of the crop are known. Let's consider the physical meaning of the π -criteria using the example of grain damage during separation under force impact. It has been established that the modulus of elasticity characterizes the grain's ability to elastically deform under force. The primary influence on grain damage is the impact force, which has a cubic dependency. The greater the force and grain density and the lower its elastic properties, the more intense the damage will be. It was also determined that the second criterion, π , includes the ratio between the modulus of elasticity and the impact force on the grain. This indicator characterizes the effect of molecular bonding forces under force impact. It reflects the grain's ability to elastically deform while maintaining internal atomic bonds within the limits of elastic deformation. Therefore, if $E > F$, relaxation occurs in the grain: the system returns to its initial state before the force application, atomic bonds are restored, the grain structure is preserved, and microcracks heal. Conversely, when $E < F$, atomic bonds break down, cracks begin to develop, and deformation transitions from elastic to plastic, becoming irreversible.

It should be noted that for model to accurately reflect the main characteristics of the studied process, each factor included in the model must demonstrate sufficient variability in the context of its impact on L.

Key words: modeling, damage, grain, separation, criterial equation, dimensional analysis, grain material, working body.